بررسی اثر اندازهٔ خرده‌لاستیک بر رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک با دستگاه برش مستقیم*

علیرضا رضاپور (۱)　　سیّد احسان سیّدی حسینی‌نیا (۲)

چکیده در این مقاله، رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. در این مطالعه، از آزمون برش مستقیم استفاده شده و مصالح مورد نظر به‌صورت زه‌کشی شده بارگذاری شده‌اند. هدف از این پژوهش، تأثیر اندازهٔ دانه‌های خرده‌لاستیک بر رفتار ترکیب ماسه و خرده‌لاستیک بوده است. بدین منظور، از یک نوع ماسه و سه اندازهٔ مختلف خرده‌لاستیک با دانه‌بندی تقریباً یکنواخت استفاده شده است. شیوهٔ پژوهش بدین صورت بوده است که ابتدا رفتار مکانیکی ماسه و خرده‌لاستیک‌ها به‌تنهایی بررسی شده و سپس این مطالعه، بر روی درصدهای اختلاط مختلف ماسه و خرده‌لاستیک انجام شده است. این پژوهش در دو بخش شامل مطالعهٔ رفتار نشست‌پذیری توده‌ها در حالت فقط سربار قائم و سپس مطالعهٔ رفتار مکانیکی تحت بارگذاری برشی انجام شده است. بررسی نتایج حاصل از بخش اول نشان می‌دهد که تودهٔ خرده‌لاستیک‌ها نشست‌پذیری خیلی بیشتری نسبت به ماسه دارند. هرچه اندازهٔ دانه‌های خرده‌لاستیک بزرگ‌تر باشد، توده نشست‌پذیری کمتری دارد. بررسی آزمون‌های برشی حاصل از بخش دوم پژوهش، نشان می‌دهد که به‌طور کلی، افزایش درصد اختلاط خرده‌لاستیک همواره موجب کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک و درنتیجه افت مقاومت برشی توده می‌شود. زاویهٔ اصطکاک داخلی توده با افزایش اندازهٔ دانهٔ خرده‌لاستیک افزایش می‌یابد. تراکم‌پذیری توده حین بارگذاری برشی با افزایش سهم خرده‌لاستیک تا ۲۰٪ روند کاهشی دارد و پس از آن اثر ناچیزی دارد. در پایان، مدول تغییرشکل محدودشدهٔ نمونه‌ها به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که اندازهٔ خرده‌لاستیک بر مدول تغییرشکل نقش مستقیم داشته است. هم‌چنین، مدول تغییرشکل تودهٔ مخلوط با افزایش سهم خرده‌لاستیک، کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک، اندازهٔ خرده‌لاستیک، آزمون برش مستقیم، رفتار مکانیکی.

A Study on the Effect of Shredded Tire Size on the Mechanical Behavior of Sand and Shredded Tire Mixtures Using Direct Shear Test

A. Rezapour　　E. Seyedi Hosseininia

Abstract *In this study, the mechanical behavior of the sand and shredded tire mixtures is studied by using direct shear box test. The aim of this research is to understand the effect of size effect of shredded tire particles on the mechanical behavior of the mixtures. Three different sizes of shredded tires are used in this study. First, the compressibility of the mixtures under consolidation pressure is studied and then, the mechanical behavior is investigated during the shear load. Under the compression stage, it is seen that the compressibility of shredded tires are much bigger than the sand alone. Also, it is seen that the compressibility is reduced as the size increases. During the shear loading stage, it is found out that the internal friction angle of the mixtures reduces as the percentage of the shredded tire increases. In addition, the friction angle is obtained larger as the size increases. As obvious, the compressibility of the mixtures increases with the increase in the percentage of shredded tire content. This is more effective until 20% content of shredded tire. The size of the shredded tire is not so effective on the compressibility, since the volumetric variation of medium to coarse shredded tire was almost equal. It is noted that in this paper, the variation of the friction angle and volumetric behavior of mixtures were investigated for different levels of specimen deformations.*

Key Words Sand and Shredded Tire Mixture, Size Effect, Direct Shear Test, Mechanical Dehavior.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۹/٤ و تاریخ پذیرش آن ۹٤/۸/۱۰ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول: دانشیار ، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.　　Email: Eseyedi@um.ac.ir

مقدمه

بر طبق سرشماری انجمن تولید لاستیک آمریکا (RMA: Rubber Manufacturer Association) تقریباً ۲۹۹ میلیون حلقه لاستیک زاید در سال ۲۰۰۵ در آمریکا تولید شده است. هم‌چنین، تقریباً ۲۶۰۰۰۰۰ تن لاستیک زاید در سال ۲۰۰۳ در اتحادیهٔ اروپا [1] ۱۰۶ میلیون حلقه لاستیک زاید در سال ۲۰۰۶ در ژاپن [2] و تقریباً حدود ۱۱۲ میلیون حلقه لاستیک هم در هندوستان [3] تولید شده است. در ایران تولید لاستیک از ۳۴ هزار تن در اول انقلاب به ۲۴۰ هزار تن در سال ۱۳۸۶ رسید که پیش‌بینی می‌شود در برنامهٔ هفتم توسعه به ۹۳۰ هزار تن در سال ۱۴۰۴ برسد [٤]. انباشته کردن این لاستیک‌ها می‌تواند یک سری مسائل و مشکلات اجتماعی را مانند به خطر انداختن سلامتی جامعه به‌دنبال داشته باشد. بر همین اساس تلاش‌های مستمر و پیوسته‌ای انجام گرفته تا یک راه حل مفید و مناسب برای استفاده از این لاستیک‌های زاید ارائه شود. هم‌اکنون، حدود ۴۵ درصد از لاستیک‌های زاید تولید شده، به‌عنوان سوخت در کوره‌های تولید سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. از کاربردهای دیگر ضایعات لاستیک می‌توان به ساخت کف‌پوش‌ها، لرزه‌گیر و عایق‌های صوتی و حرارتی اشاره کرد. در مهندسی عمران و به‌خصوص در مهندسی ژئوتکنیک، سعی شده است تا از این مصالح به شکل ریزشده و یا خردشده استفاده شود. این مواد به‌عنوان مصالح پرکنندهٔ خاکریز برای پشت دیوارهای حائل [5] و لایهٔ زه‌کش استفاده می‌شوند که معمولاً به‌همراه ماسه برای کاهش تراکم‌پذیری آن لایه استفاده می‌شود.

مروری بر تحقیقات گذشته

در مهندسی ژئوتکنیک، پژوهش‌های متعددی بر روی تأثیر وجود قطعات خردشده و بریده‌شدهٔ لاستیکی بر رفتار مکانیکی مخلوط آن با خاک انجام شده است. به‌طور کلی، قطعات لاستیکی استفاده‌شده در تحقیقات، به‌صورت تکه‌های چند سانتی‌متری به‌نام لاستیک بریده‌شده (tire chips) و یا به‌صورت پودر (در حد میلی‌متر و در بازهٔ دانه‌های ماسه) به‌نام خرده‌لاستیک (shredded tire) مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

از میان تحقیقاتی که با دستگاه سه محوری انجام شده، می‌توان به تحقیقی که Gotteland et al. [6] انجام داد، اشاره کرد. آنها اثر چیدمان قرارگیری نوارهای لاستیکی بریده‌شده بر خواص مکانیکی مخلوط ماسه با لاستیک‌های بریده‌شده را مطالعه کردند. در کار دیگری توسط Bałachowski and Gotteland [7]، دستگاه سه‌محوری برای مطالعهٔ رفتار مخلوط ماسه و لاستیک خردشده/ بریده‌شده مورد استفاده قرار گرفت. آنها مشاهده کردند که مقدار زاویهٔ اصطکاک داخلی مخلوط با افزایش درصد لاستیک، کاهش پیدا می‌کند. در تحقیقات دیگری توسط Zorenberg et al. [8] و [9] Lee et al.، از لاستیک‌های بریده‌شده به‌صورت نواری در ترکیب با خاک ماسه‌ای استفاده شده و پارامترهای مقاومت برشی مخلوط‌ها به‌دست آمده است.

علاوه بر دستگاه سه محوری، دستگاه برش مستقیم نیز برای مطالعهٔ مخلوط خاک و قطعات لاستیکی استفاده شده که به‌خاطر سهولت در نحوهٔ انجام آزمایش، از محبوبیت بیشتری برخوردار است. شایان ذکر است اکثر تحقیقات انجام شده بر روی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک، با دستگاه برش مستقیم بوده است. Attom [10] آزمایش‌های برش مستقیمی بر روی سه نوع ماسه با دانه‌بندی متفاوت و چهار درصد مختلف خرده‌لاستیک انجام داد. بر طبق نتایج او، زاویهٔ اصطکاک داخلی با افزایش درصد لاستیک افزایش پیدا می‌کند. در پژوهش دیگری، Cabalar [11] چندین آزمایش برش مستقیم بر روی دو ماسهٔ ریز Ceyhan و ماسهٔ ریزتر Leighton Buzzard انجام داد. ماسهٔ Ceyhan تیز گوشه و ماسهٔ Leighton Buzzard گردگوشه است. او مشاهده کرد که در ماسهٔ Ceyhan با افزایش درصد خرده‌لاستیک، زاویهٔ اصطکاک داخلی کاهش یافت ولی در ماسهٔ Leighton Buzzard با

افـزودن ۱۰ تـا ۲۰ درصـد لاسـتیک خـردشـده، زاویـهٔ اصطکاک داخلی حداکثـر بـه حـدود ۳۷ درجـه رسـید. Humphrey et al. [12] مجموعه‌ای از آزمون‌های برش مستقیم را بر روی سه انـدازهٔ مختلـف از لاسـتیک‌هـای بریده‌شده و بااستفاده از جعبهٔ برش مستقیم انجام دادند. آنها مشاهده کردند با افزایش انـدازهٔ قطعـات لاسـتیک، مقادیر پارامترهای مقاومت برشی افـزایش یافتـه اسـت. هم‌چنین، آنـان مشـاهده کردنـد کـه بـا افـزایش انـدازهٔ قطعات لاسـتیک نمونـه‌هـای بـدون چسـبندگی، دارای چسبندگی ظاهری شده‌اند. Yang et al. [13] بـا انجـام آزمـایش‌هـای بـرش مسـتقیمی بـر روی لاسـتیک‌هـای خردشده، دریافتند که تنش برشی تمامی نمونه‌هـا رونـد صعودی داشته و به مقدار حداکثری نرسـیده اسـت. در تحقیقـی کـه توسـط Ghazavi [14] انجـام شـد، آزمـایش‌هـای بـرش مسـتقیم بـر روی مـواد لاسـتیکی خردشده با ماسه در دو تراکم متفاوت انجام گرفـت کـه نشـان از تأثیرپـذیرتر بـودن وجـود خـرده‌لاسـتیک در نمونه‌های سسـت‌تـر بـوده اسـت. Moo-Young et al. [15] آزمایش‌های برش مستقیمی بر روی لاستیک‌هـای دور انداخته‌شده در اندازه‌های مختلف انجام دادند. آنان بیان کردند که افـزایش انـدازهٔ دانـه‌هـا و تـراکم باعـث افزایش مقاومت برشـی لاسـتیک‌هـای دور ریختـه‌شـده می‌شود. هم‌چنین اگر انـدازهٔ دانـه‌هـای لاسـتیک‌هـا در محدودهٔ ۵۰ تـا ۱۰۰ میلـی‌متـر باشـد، بیشـترین مقـدار مقاومت برشی به‌دست می‌آید.

باتوجه به مرور ادبیات فنی گذشته، با این‌که تـأثیر اندازهٔ لاستیک بریده‌شده در مخلوط بررسی شـده، ولـی تاکنون اثر اندازهٔ لاستیک خردشـده (نزدیـک بـه انـدازهٔ دانه‌های ماسه) بر رفتار مکانیکی بررسی نشده اسـت. از طرف دیگر، در ادبیات فنی به‌سختی یک کـار پژوهشـی یافت می‌شود که در آن، هر دو مقولهٔ مقاومت برشـی و تغییرشکل مطالعه شده باشند. ازاین‌رو، در این پـژوهش سعی شده است تا با درنظـر گـرفتن مشخصـات ثـابتی بـرای یـک خـاک ماسـه‌ای، از سـه انـدازهٔ مختلـف خرده‌لاستیک استفاده شـود و تـأثیر انـدازهٔ دانـه‌هـا بـر مقاومت برشی و تراکم‌پذیری مخلوط با خـاک ماسـه‌ای در درصدهای اختلاط مختلف مطالعه گردد.

فعالیت‌های آزمایشگاهی

تمامی آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه مکانیـک خاک دانشکدهٔ مهندسی دانشگاه فردوسی مشـهد انجـام شده است. در این پـژوهش، از یـک نـوع ماسـه و سـه دسته خرده‌لاستیک با اندازه‌های متفـاوت اسـتفاده شـده اسـت. بـرای بررسـی تـأثیر محتـوای خـرده‌لاسـتیک، نمونه‌هایی با درصدهای وزنی صفر، ۲۰، ٤۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد برای هر یک از سه اندازهٔ خرده‌لاسـتیک سـاخته شده‌اند. رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک بـا دستگاه برش مستقیم انجام شده است.

مصالح مورد استفاده در پژوهش

مصالح مورد استفاده در این پـژوهش شـامل یـک نـوع ماسه و سه اندازهٔ متفاوت لاستیک خردشده بوده اسـت. از ماسهٔ موجود در آزمایشـگاه مکانیـک خـاک اسـتفاده شـده اسـت. شـکل ذرات ماسـه تیزگوشـه اسـت. خرده‌لاستیک‌ها از کارگاهی در منطقهٔ خین‌عرب مشـهد که در آن، لاستیک‌هـا توسـط یـک رنـدهٔ مکـانیکی بـه اندازه‌های مختلف تبدیل می‌شـوند، تهیـه شـده‌انـد. در انتخاب اندازهٔ خرده‌لاستیک‌ها طوری عمل شـده اسـت که محدودیت و شرایط اسـتاندارد انجـام آزمـون بـرش مستقیم برای حداکثر اندازهٔ دانه‌ها ارضـا شـود. در ایـن پژوهش، خرده‌لاستیک‌ها با نام‌های خرده‌لاسـتیک ریـز، خرده‌لاستیک متوسط و خرده‌لاستیک درشت نام‌گـذاری شده‌اند. شـکل (۱) شـکل و انـدازهٔ دانـه‌هـای ماسـه و خرده‌لاسـتیک‌هـای مـورد آزمـایش را نشـان مـی‌دهـد. هم‌چنین، در این پژوهش از آزمایش‌هـای دانـه‌بنـدی و تعیین دانسیتهٔ کمینه و بیشینه توسـط میـز لـرزان طبـق استاندارد استفاده شده است که در ادامه بـه شـرح آنهـا

پرداخته می‌شود.



(الف)

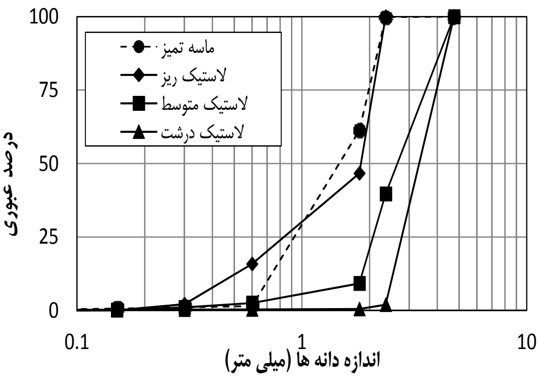


(ب)

شکل ۱ نمایش (الف) ماسه تیزگوشه و (ب) خرده‌لاستیک‌های مورد آزمایش (از راست به چپ ریزتر می‌شود)

دانه‌بندی مصالح

شکل (۲) منحنی دانه‌بندی ماسهٔ تمیز و انواع خرده‌لاستیک‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که منحنی دانه‌بندی مربوط به خرده‌لاستیک درشت در طرف راست نمودار قرار گرفته است.



شکل ۲ منحنی دانه‌بندی مصالح استفاده‌شده

تعیین چگالی و تراکم نسبی

برای به‌دست آوردن چگالی دانه‌های جامد (G_s) طبق استاندارد ASTM D854-02 عمل شده است. آزمایش فوق با دو پیکنومتر ۲۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌لیتری تکرار شده و مقادیر حاصل از این آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. مشاهده می‌شود که چگالی دانه‌های جامد ماسه، تقریباً ۲/۵ برابر خرده‌لاستیک است.

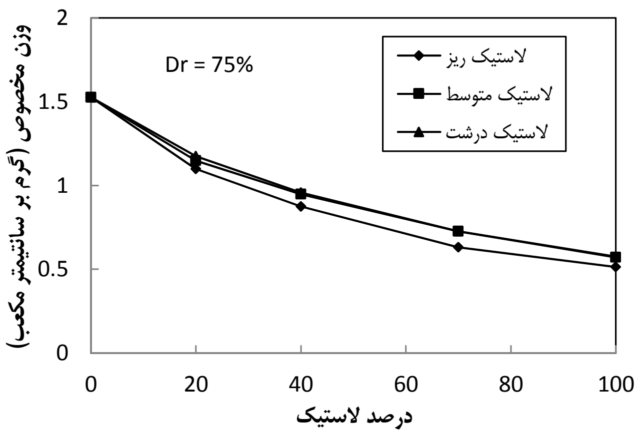
جدول ۱ مقادیر چگالی دانه‌های جامد (گرم بر سانتی‌متر مکعب) برای دو حجم مختلف پیکنومتر

پیکنومتر / ماده	۲۵۰ میلی‌لیتر	۱۰۰۰ میلی‌لیتر
خرده‌لاستیک	۱/۱۳ – ۱/۱۴	۱/۱۴ – ۱/۱۵
ماسه	۲/۶۵–۲/۶۷	۲/۶۵–۲/۶۷

در این پژوهش، تمامی نمونه‌های مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک در یک تراکم نسبی برابر با $D_r = 75\% \pm 5\%$ تهیه شده‌اند. به‌منظور تعیین تراکم نسبی نمونه‌ها، برای هریک از نسبت‌های اختلاط، آزمون تعیین دانسیتهٔ بیشینه براساس ASTM D4253-93 و آزمون تعیین دانسیتهٔ کمینه براساس ASTM D4254-93 انجام گردید که نتایج آن مطابق با جدول (۲) است. شکل (۳) مقادیر وزن مخصوص به‌دست آمده را برای درصد اختلاط‌های مختلف و خرده‌لاستیک‌های ریز، متوسط و درشت با تراکم نسبی ۷۵٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد لاستیک در مخلوط، وزن مخصوص کاهش یافته است. ضمناً با درشت‌تر شدن اندازهٔ خرده‌لاستیک‌ها وزن مخصوص بیشتر شده است، به‌طوری که این مقادیر بین ۰/۵ تا ۱/۵۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمده‌اند.

جدول ۲ مقادیر وزن مخصوص بیشینه و کمینهٔ مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

درصد محتوای وزنی لاستیک	لاستیک ریز		لاستیک متوسط		لاستیک درشت	
	مقدار کمینه	مقدار بیشینه	مقدار کمینه	مقدار بیشینه	مقدار کمینه	مقدار بیشینه
صفر	۱.٤۱	۱.۵۷	۱.٤۱	۱.۵۷	۱.٤۱	۱.۵۷
۲۰	۰.۹۹	۱.۱٤	۱.۰٦	۱.۱۸	۱.۰۸	۱.۲۱
٤۰	۰.۷٤	۰.۹۳	۰.۸٦	۰.۹۸	۰.۸۷	۰.۹۹
۷۰	۰.۵۲	۰.٦۸	۰.٦٤	۰.۷٦	۰.٦٤	۰.۷٦
۱۰۰	۰.٤۱	۰.۵٦	۰.٤۸	۰.٦۱	۰.٤۹	۰.٦۱



شکل ۳ وزن مخصوص با درصد محتوای لاستیک برای درجه تراکم ۷۵٪

مشخصات دستگاه برش

بـرای بررسـی رفتـار مکـانیکی مخلـوط ماسـه و خرده‌لاستیک از دستگاه بـرش مسـتقیم مربعـی ۱۰x۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. این دستگاه محصول سـال ۱۹۹۱ میلادی شرکت ELE است و قابلیت اعمال نـرخ جابه‌جـایی ۰/۰۰۰۵ تـا ۲ میلـی‌متـر بـر دقیقـه را دارد. گیج‌های نصـب‌شـده روی دسـتگاه، حساسـیتی معـادل ۰/۰۰۲ میلی‌متر را دارنـد. ایـن آزمـون طبـق اسـتاندارد ASTM D3080 انجام شده است. طبق ایـن اسـتاندارد، ابعاد جعبه و ضخامت آن حداقل باید ۱۰ و شش برابـر بزرگترین قطـر دانـه‌هـا باشـد کـه باتوجـه بـه منحنـی دانه‌بندی درشت‌تـرین خـرده‌لاسـتیک (شـکل ۲)، ایـن نسبت به‌حدود ۳۰ می‌رسـد و درنتیجـه، نگرانـی بابـت اندازهٔ جعبهٔ آزمایش وجود ندارد. البتـه ذکـر ایـن نکتـه ضروری است که در ادبیات فنی، پـژوهش‌هـایی یافـت می‌شود که در آن به تأثیر اندازهٔ دانـه‌هـا توجـه کـرده و اعلام کرده‌اند که حداقل بعد جعبه باید بین ۵۰ تـا ۳۰۰ برابر قطر دانه باشد [16].

مراحل مختلف این آزمون عبارتست از قـرار دادن نمونهٔ ساخته شده در ابزار برش مسـتقیم، اعمـال تـنش عمودی از پیش تعیین‌شده، تحکیم نمونـه تحـت تـنش عمودی، بازکردن قاب‌های نگهدارنـدهٔ نمونـهٔ آزمـایش، جابه‌جایی افقی یک فک نسبت به فک دیگری بـا نـرخ ثابت تغییرمکان برشی و انـدازه‌گیـری نیـروی برشـی و تغییرمکان‌های افقی نمونهٔ تحت برش.

شرح مختصر روش انجام آزمایش

ابتدا ماسه و خرده‌لاستیک با درصدهای وزنـی از پـیش

تعیین‌شده باهم مخلوط می‌شوند. سپس، با درنظر گرفتن تراکم ۷۵ درصد برای نمونه‌ها و محاسبهٔ وزن مخصوص نمونه (شکل ۳)، وزن لازم برای پرکردن قالب برش به‌دست می‌آید. باید نمونه را طوری متراکم نمود تا با گذاشتن صفحهٔ برش بالایی، این صفحه با سطح بالایی قالب هم‌سطح شود. برای بررسی نشست نمونه با زمان قبل از برش، نمونه را در دستگاه قرار داده و با قرار دادن سربارها در زمان‌های مختلف مقدار گیج قائم ثبت می‌شود. نحوهٔ بارگذاری به‌صورت تدریجی بوده است، بدین صورت که تا رسیدن به تنش سربار مورد نظر، سربار در چند مرحله وارد شده است. برای ثبت اولیهٔ مقدار نشست (تحت سربار کوچک)، به‌جای قرار دادن اهرم بار، از یک لولهٔ سبک و دو گیج در طرفین آن استفاده شده است. دلیل استفاده از دو گیج، سرشکن کردن نشست‌های غیر متقارن بوده است. قرائت نشست تا زمانی طول می‌کشد که تغییرات نشست ناچیز شود. پس از ثابت شدن مقدار نشست، سربار بعدی قرار داده می‌شود. این کار تا قراردادن سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال ادامه یافته است. شکل ٤ نمونه را تحت بارگذاری مرحلهٔ آخر (۱۰۰ کیلوپاسکال) نشان می‌دهد.



شکل ٤ نمونهٔ تحت بارگذاری ۱۰۰ کیلوپاسکال

پس از نشست کامل نمونه در سربار موردنظر، نیروی برشی به نمونه وارد می‌شود. این عمل به‌کمک موتور الکتریکی با سرعت کرنش یک میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفته است. شایان ذکر است برای بررسی تأثیر سرعت بارگذاری، نمونهٔ ماسه و نمونه‌های خرده‌لاستیک به‌تنهایی تحت سرعت‌های جابه‌جایی ۰/۲، یک و دو میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری شدند. با مقایسهٔ نمودارهای تنش-کرنش آن‌ها و یکسان بودن مسیر تنش‌ها، مشاهده شد که سرعت بارگذاری نقشی بر رفتار مکانیکی ندارد. به‌منظور رسم پوش گسیختگی و تعیین پارامترهای مقاومت برشی، نمونه‌ها در سه سربار عمودی (قائم) ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال تحت برش قرار گرفته‌اند. با توجه به سه نوع خرده‌لاستیک و سه سربار و پنج مقدار اختلاط قید شده، درمجموع ٤۵ آزمایش برش مستقیم انجام گرفته است. جزئیات بیشتر در مرجع [۱۷] ارائه شده است.

نتایج

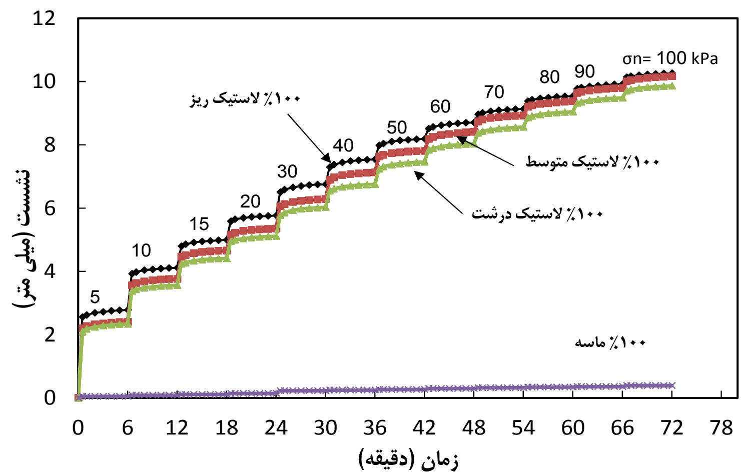
در مرحلهٔ قبل از بارگذاری برشی، نمونه‌ها فقط تحت بارگذاری قائم قرار گرفتند و درنتیجه، نشست‌پذیری نمونه‌ها بررسی شده‌اند، درحالی‌که، در مرحلهٔ دوم که بارگذاری به‌صورت برشی بوده است، علاوه بر بحث تراکم‌پذیری، مقاومت برشی نمونه‌ها هم مطالعه شده‌اند. نتایج درادامه تشریح شده‌اند.

تراکم‌پذیری نمونه‌ها قبل از اعمال برش

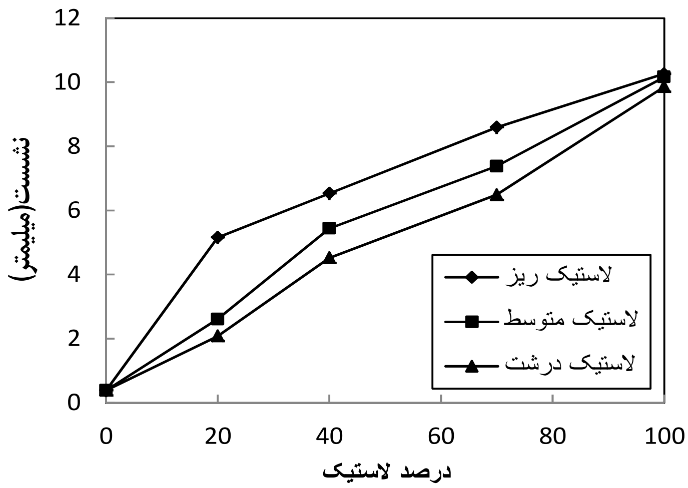
شکل (۵) نمودار نشست برحسب زمان نمونه‌های حاوی ماسهٔ تمیز و خرده‌لاستیک را نشان می‌دهد. نمونهٔ ماسه‌ای تحت بیشترین سربار حدود ۰/۵ میلی‌متر نشست داشته است، در صورتی‌که نمونهٔ خرده‌لاستیک‌ها در حد ۱۰ میلی‌متر نشست داشته‌اند. به‌عبارت دیگر، اگر در خاک‌ریزی، به‌جای ماسه، از خرده‌لاستیک به‌عنوان مصالح پرکننده استفاده شود، مقدار نشست آن، حدود ۲۰ برابر بیشتر می‌شود. از میان خرده‌لاستیک‌ها، همان‌طور که مشاهده می‌شود، هرچه خرده‌لاستیک‌ها

ریزتر باشند، نشست بیشتر شده است. هم‌چنین، مقدار اختلاف نشست‌ها در میان خرده‌لاستیک‌ها، در سربارهای کم، کوچک بوده است، ولی با افزایش سربار، این مقدار اختلاف کاهش می‌یابد.

باتوجه به تراکم‌پذیری بالای مصالح خرده‌لاستیک، می‌توان این خاصیت را با افزودن ماسه به آن اصلاح نمود. شکل (٦) مقدار نشست نمونه‌های مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال را برحسب محتوای خرده‌لاستیک نشان می‌دهد. به‌طور کلی، مشاهده می‌شود که افزودن ماسه در کنار خرده‌لاستیک باعث کاهش نشست‌پذیری تودهٔ مخلوط شده است. تغییرات نشست با درصد خرده‌لاستیک از نوع متوسط و درشت تقریباً خطی است، درصورتی‌که نشست مخلوط با خرده‌لاستیک با دانهٔ بزرگ‌تر، بیشتر شده است. در این نمودار، هم‌چنان مشاهده می‌شود که اندازهٔ دانه‌های خرده‌لاستیک نقش مهمی در مقدار نشست‌پذیری دارد. هرچه دانه‌های خرده‌لاستیک درشت‌تر باشد، نشست کمتر می‌شود. البته این قاعده برای درصد اختلاط‌های ۲۰-۸۰ بیشتر بروز می‌کند.



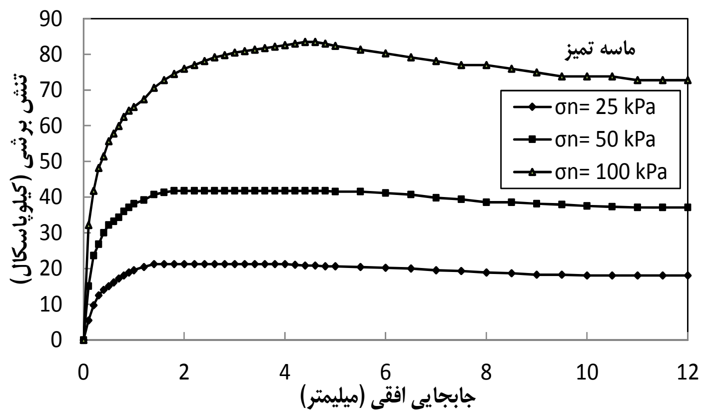
شکل ۵ تغییرات نشست نمونهٔ حاوی فقط ماسه و خرده‌لاستیک برحسب زمان تحت سربارهای مختلف

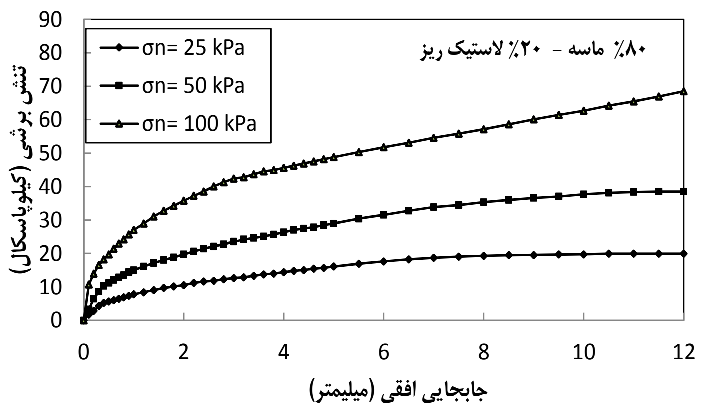


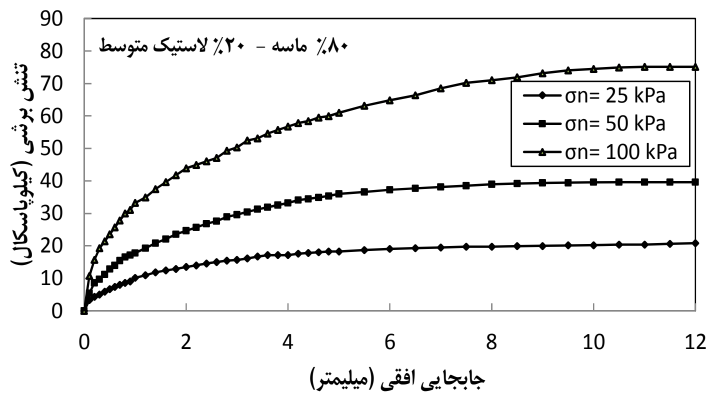
شکل ٦ نمودار حداکثر نشست برحسب محتوای خرده‌لاستیک زیر اعمال سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال

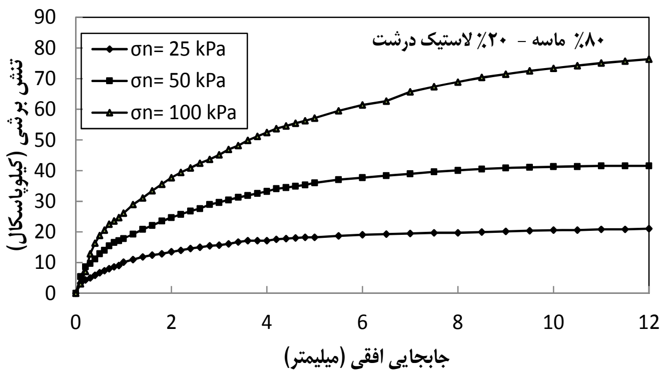
روند تغییرات مقاومت برشی

شکل (۷) نمودارهای تغییرات تنش برشی را برحسب جابه‌جایی افقی برای نمونهٔ ماسهٔ تمیز و نمونه‌های حاوی ۲۰٪ خرده‌لاستیک (به‌عنوان نمونه) از اندازه‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نمونهٔ حاوی ماسهٔ تمیز، رفتاری سخت‌شونده- نرم‌شونده دارد، درصورتی‌که با افزودن ۲۰٪ خرده‌لاستیک، نقطهٔ قله در نمودار مقاومت برشی از بین می‌رود و تنش برشی مرتباً در حال افزایش است. به عبارت دیگر، رفتار نمونه از حالت ترد (افت مقاومت پس از کرنش حدود ٤٪)، به حالت شکل‌پذیر درآمده است. در بقیه نسبت‌های اختلاط نیز چنین روندی مشاهده می‌شود.

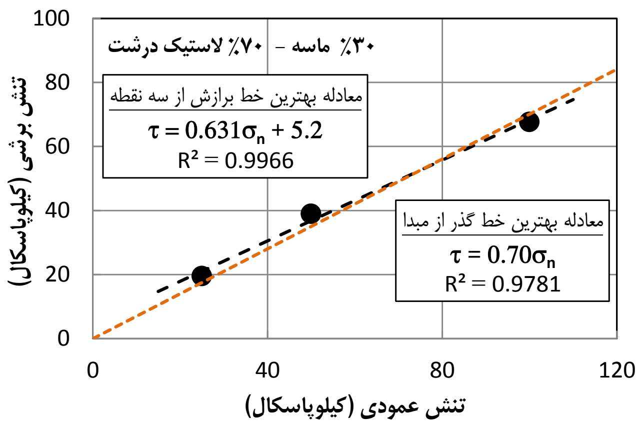








شکل ۷ تغییرات تنش برشی با جابه‌جایی افقی تحت تنش‌های عمودی مختلف برای ماسهٔ تمیز و مخلوط‌های ۸۰٪ ماسه- ۲۰٪ خرده‌لاستیک



شکل ۸ نمایش پوش‌های گسیختگی برای مخلوط ۳۰٪ماسه- ۷۰٪ خرده‌لاستیک درشت

پارامترهای مقاومت برشی مخلوط

مطالعه و تعیین مقاومت برشی مصالح دانه‌ای با کمک معیار کولمب انجام می‌شود که با رابطهٔ $\tau_f = \sigma_n \tan\phi + c$ تعریف می‌گردد. در این معیار، رابطهٔ میان مقاومت برشی (τ_f) با تنش عمودی وارد بر سطح (σ_n) توسط دو معیار زاویهٔ اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (c) تعریف می‌شود. این دو پارامتر با کمک برازش دادن بهترین خط گذرنده از میان سه نقطه در فضای مختصات تنش برشی- تنش عمودی وارد بر سطح برش به‌دست می‌آید.

برای مصالح دانه‌ای که میان ذرات آن چسبندگی کمی و یا ناچیزی وجود دارد، به‌جای دو پارامتر مذکور، از یک پارامتر دیگر به‌نام زاویهٔ اصطکاک داخلی معادل استفاده می‌شود. درواقع، این پارامتر از روی شیب بهترین خط برازش‌شده و گذرنده از مبدأ مختصات به‌دست می‌آید. مزیت استفاده از این پارامتر، سادگی در مطالعهٔ مقاومت برشی (استفاده از یک پارامتر به‌جای دو پارامتر) است که در ادامه و براساس نتایج به‌دست آمده شرح داده می‌شوند.

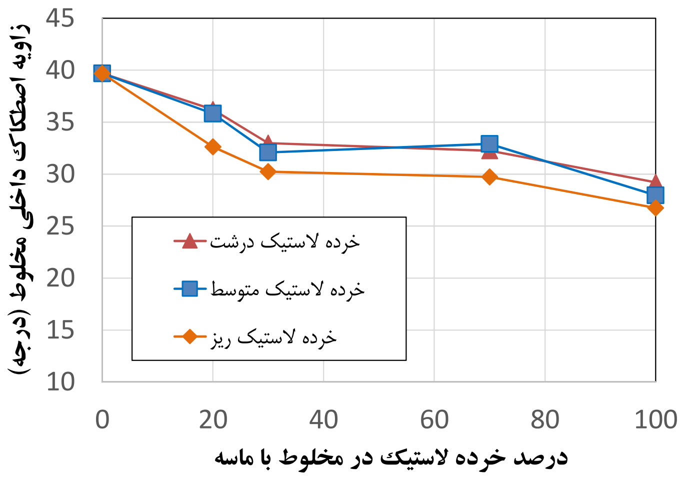
در این پژوهش، معیار (پوش) گسیختگی برای تمام مخلوط‌ها باکمک برازش رسم بهترین خط مستقیم از میان سه نقطهٔ مربوط به تنش‌های عمودی $\sigma_n = 25,\ 50,\ 100\ kPa$ حاصل شده است. به‌عنوان نمونه، پوش‌های گسیختگی مربوط به مقادیر بیشینهٔ تنش برشی

برای مخلوط ۳۰٪ماسه- ۷۰٪خرده‌لاستیک درشت در شکل (۸) نشان داده شده است. منظور از R^2 در این شکل، ضریب رگرسیون خطی است. معادله‌های بهترین خط‌های گذرنده از میان سه نقطه و نیز سه نقطه به‌همراه مبدأ مختصات نشان داده شده‌اند. عرض از مبدأ نشان‌دهندۀ چسبندگی است و شیب خط برابر با تانژانت زاویۀ اصطکاک داخلی خاک است.

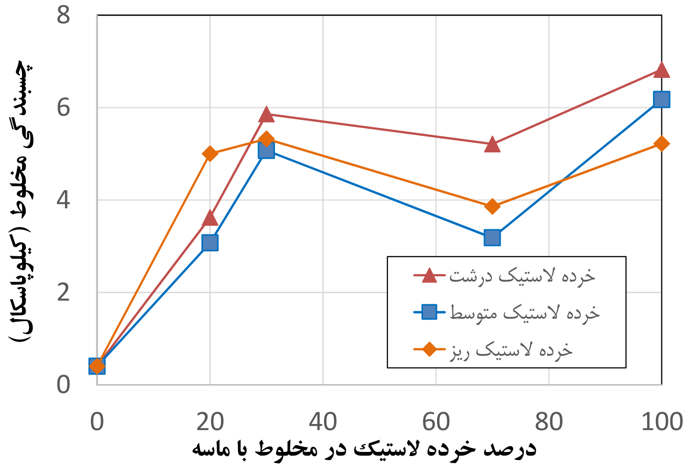
شکل (۹) روند تغییرات زاویۀ اصطکاک داخلی خاک (متناظر با تنش برشی بیشینه) و چسبندگی مخلوط‌ها با درصدهای مختلف ماسه و خرده‌لاستیک را نشان می‌دهد. در شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود که با افزایش سهم خرده‌لاستیک، زاویۀ اصطکاک داخلی مخلوط همواره کاهش می‌یابد. زاویۀ اصطکاک داخلی برای مخلوط‌های درشت و متوسط تقریباً مثل هم است و از مقادیر متناظر با خرده‌لاستیک ریز بزرگ‌تر می‌باشد. شایان ذکر است که نتایج این پژوهش با نتایج قبلی [8,11] تطابق دارد. در شکل (۹-ب) مشاهده می‌شود که در تمام آزمایش‌ها، با افزایش درصد خرده‌لاستیک از صفر تا ۳۰ درصد، چسبندگی توده افزایش می‌یابد. ولی پس از آن در نسبت ۷۰٪ افت دارد و درنهایت، تودۀ حاوی فقط خرده‌لاستیک، بیشترین چسبندگی است. درضمن، اثر مستقیم اندازۀ خرده‌لاستیک‌ها به‌وضوح قابل مشاهده است. نتایج کارهای دیگران [7, 8] نیز مؤید این موضوع است که صرف‌نظر از اندازۀ دانه‌ها و در سهم‌های کوچک خرده‌لاستیک، مخلوط حاوی ۳۰٪ خرده‌لاستیک، بیشترین چسبندگی را داشته است.

در مکانیک خاک کلاسیک، مرسوم است که زاویۀ اصطکاک داخلی و چسبندگی متناظر با حداکثر تنش برشی تحمل‌شده درنظر گرفته شود. این امر نشان‌دهندۀ حد نهایی مقاومت است. درصورتی‌که در دیدگاه سطوح عملکرد که هم‌اکنون در طراحی‌های ژئوتکنیکی مورد توجه قرار می‌گیرد، به تغییرشکل‌های قابل تحمل خاک و سازۀ روی آن نیز توجه می‌شود. ازاین‌رو، در ادامۀ این پژوهش، مقدار زاویۀ اصطکاک داخلی معادل مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک به‌عنوان فقط یک پارامتر دخیل در تعریف مقاومت برشی در سطوح مختلف تغییرشکلی محاسبه و مقایسه می‌شود.

در شکل (۱۰) تغییرات زاویۀ اصطکاک داخلی معادل برای مخلوط‌های با خرده‌لاستیک‌های ریز، متوسط و درشت و در سطوح تغییرشکل‌های مختلف و با درصدهای اختلاط مختلف نمایش داده شده است. با دقت در این مقادیر ملاحظه می‌شود که در تمامی نمونه‌ها با افزایش درصد محتوای لاستیک، مقدار زاویۀ اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد، با این تفاوت که نمونه‌های ساخته‌شده از خرده‌لاستیک درشت، کاهش کمتری را نشان می‌دهند. اگر به نمودارهای رسم شده برای جابه‌جایی سه میلی‌متر دقت شود، ملاحظه می‌شود که مقادیر زاویۀ اصطکاک داخلی از ۳۹ درجه، برای نمونۀ ماسۀ تمیز تا ۱۸ درجه برای نمونۀ لاستیک ریز ۱۰۰ درصد کاهش پیدا می‌کند، این در حالی است که در جابه‌جایی ۹ میلی‌متر این مقدار از ۳۷ درجه به ۲۹ درجه کاهش پیدا می‌کند. نکتۀ دیگر آن‌که در نمودارهای جابه‌جایی ۹ میلی‌متر برای لاستیک درشت فقط دو درجه به‌ازای افزودن ٤۰ درصد لاستیک کاهش زاویۀ اصطکاک مشاهده می‌شود؛ یعنی حدس زده می‌شود که اگر از خرده‌لاستیک‌هایی با اندازه‌های درشت‌تر استفاده شود، می‌توان امیدوار بود که زاویۀ اصطکاک داخلی ثابت باقی بماند و حتی این‌که بیشتر شود. البته در این صورت، دیگر به موارد مورد نظر خرده‌لاستیک گفته نمی‌شود، بلکه در طبقه‌بندی لاستیک بریده شده قرار می‌گیرد. افزایش زاویۀ اصطکاک توده در مخلوط ماسه و لاستیک بریده شده توسط محققان دیگری که در بخش دو مقاله اشاره شده، گزارش شده است. درصورتی‌که مقدار زاویۀ اصطکاک برای حداکثر برش محاسبه شود، روندی مشابه با معیار جابه‌جایی ۹ میلی‌متر دیده می‌شود.

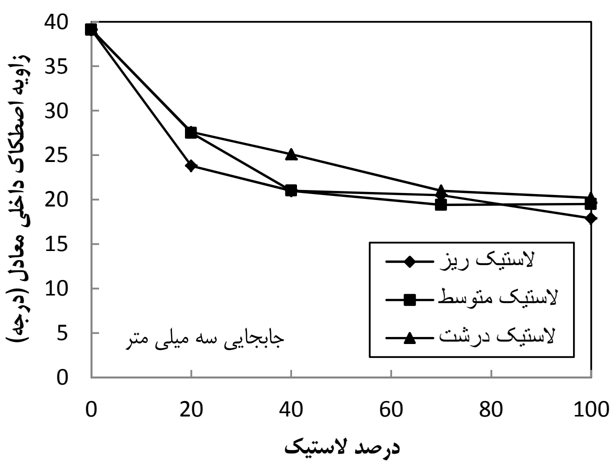


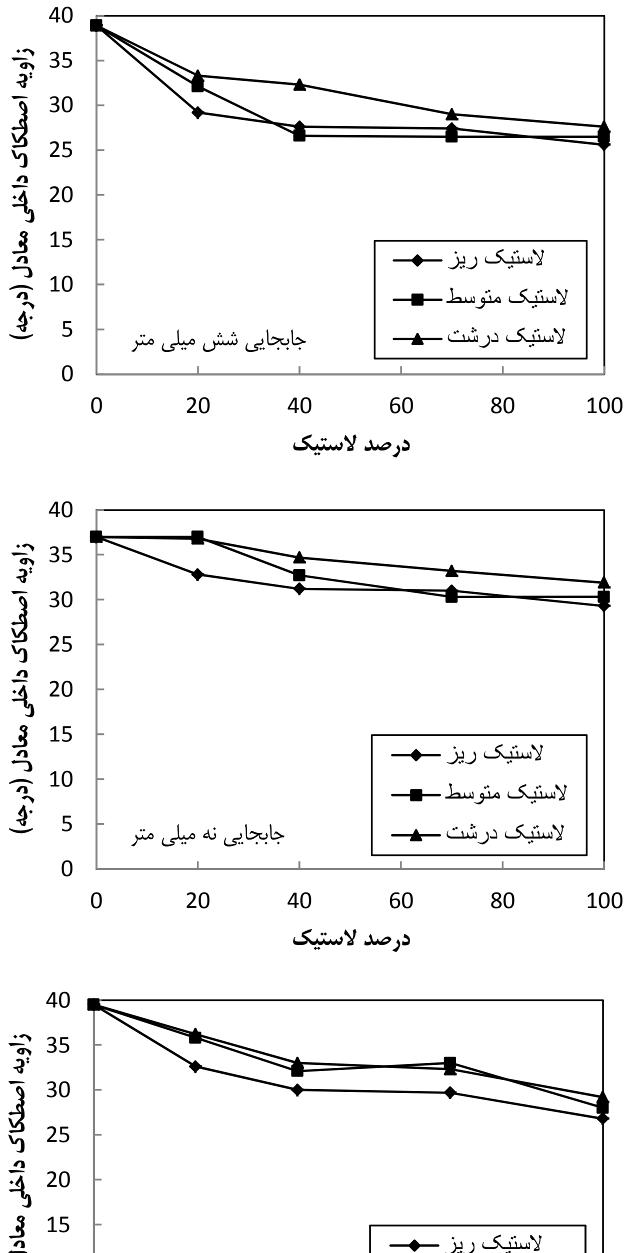
(الف)



(ب)

شکل ۹ روند تغییرات (الف) زاویهٔ اصطکاک داخلی، (ب) چسبندگی مخلوط ماسه با خرده‌لاستیک متناظر با تنش برشی بیشینه





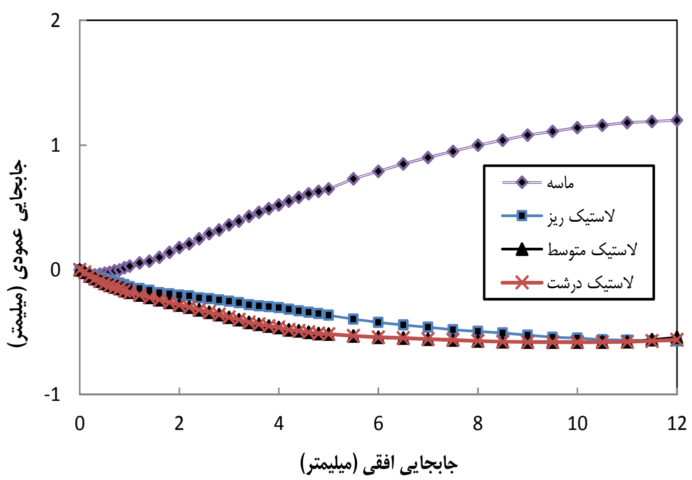
شکل ۱۰ تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی معادل برای لاستیک‌های ریز، متوسط و درشت

بررسی تغییرات حجمی نمونه‌ها حین برش

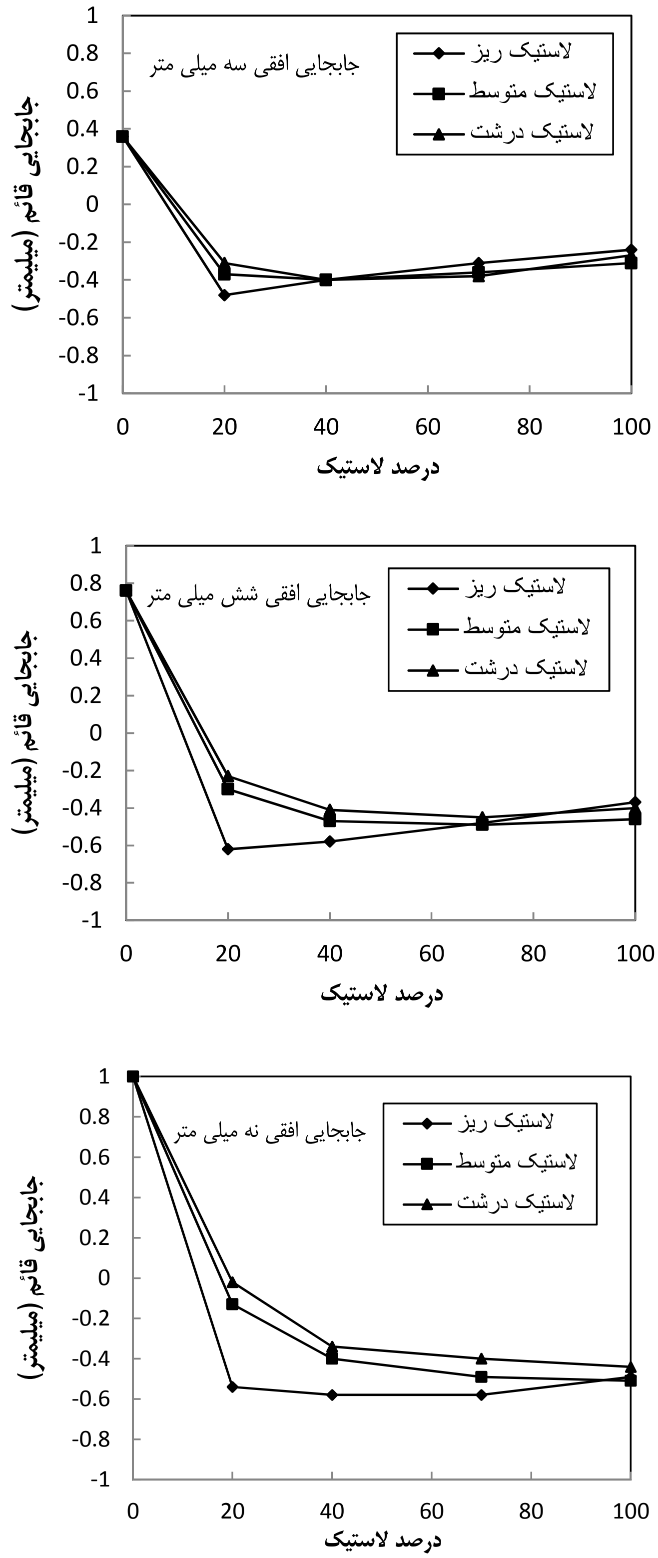
علاوه بر تغییرات مقاومت برشی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک، تغییرات حجمی نمونه حین برش هم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا تغییرشکل‌های

تودهٔ خاک عمدتاً تحت اعمال بارگذاری برشی رخ می‌دهند. برای بررسی تغییرات حجمی نمونه حین برش در آزمون برش مستقیم، از جابه‌جایی قائم نمونه استفاده می‌شود. به‌منظور مقایسهٔ رفتار حجمی ماسه و خرده‌لاستیک‌ها، تغییرات جابه‌جایی افقی و قائم در آزمون برش مستقیم تحت تنش عمودی ۲۵ کیلوپاسکال در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونهٔ ماسه‌ای ابتدا رفتار تراکمی دارد (در جابه‌جایی کمتر از ۰/۵ میلی‌متر معادل نیم درصد) و سپس رفتار اتساعی آن شروع می‌شود و تا انتهای آزمایش، افزایش حجم دارد؛ درصورتی‌که در نمونه‌های با ۱۰۰٪ خرده‌لاستیک، رفتار تغییرشکلی فرق دارد و همگی رفتار تراکمی از خود نشان می دهند. دلیل تفاوت رفتار، در شکل‌پذیری دانه‌هاست. اندازهٔ دانه‌های لاستیک نیز در روند تغییرشکل‌پذیری نقش دارد، بدین صورت که خرده‌لاستیک ریز رفتار تراکمی کمتری از خود نشان داده است. ازطرفی، رفتار خرده‌لاستیک‌های متوسط و درشت تقریباً مشابه هم بوده‌اند. به‌عبارت دیگر، برخلاف نشست‌پذیری نمونه‌ها تحت فقط سربار قائم که متأثر از اندازهٔ دانه‌ها بود (شکل ۵)، با افزایش اندازه دانه‌ها، رفتار تغییرشکل حین برش فرقی نکرده است. با این حال، باید گفت که مقدار تغییر حجم هر سه نمونهٔ خرده‌لاستیک، در پایان آزمایش یکسان به‌دست آمده است.

به‌منظور بررسی تأثیر درصد اختلاط ماسه و خرده‌لاستیک، تغییرشکل‌های تمام نمونه‌ها برداشت شده است و مشابه تعریف زاویهٔ اصطکاک داخلی در تغییرشکل‌های افقی مختلف، مقدار تغییرشکل‌های قائم در مراحل مختلف در شکل (۱۲) ارائه شده است. نمودارها همگی برای آزمایش‌های با سربار ۲۵ کیلوپاسکال نشان داده شده‌اند. مقدار مثبت محور قائم نشانگر تورم نمونه (افزایش حجم) و مقدار منفی نشانگر انقباض نمونه است. یادآوری می‌شود که رفتار ماسه به‌شدت اتساعی است، ولی همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، با افزودن ۲۰٪ خرده‌لاستیک به ماسه، رفتار آن به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد و مقدار تورم در آن کاهش می‌یابد. مقدار کاهش تورم در مخلوط با خرده‌لاستیک بیشتر بوده است. هم‌چنین، مشاهده می‌شود که افزودن بیش از ۲۰٪ خرده‌لاستیک، تأثیر بسزایی در تغییر روند تغییرشکل‌ها نداشته است.



شکل ۱۱ تغییرات جابه‌جایی قائم نسبت به تغییرشکل افقی نمونه‌های حاوی ماسهٔ تمیز و خرده‌لاستیک تحت تنش عمودی ۲۵ کیلوپاسکال

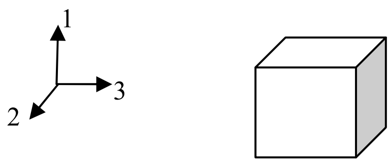


شکل ۱۲ تغییرات جابه‌جایی قائم در نسبت اختلاط‌های مختلف خرده‌لاستیک تحت تنش عمودی ۲۵ کیلوپاسکال

تعیین مدول تغییرشکل

در طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی، علاوه بر مقولهٔ مقاومت برشی و تعیین پارامترهای آن، باید به مقولهٔ تغییرشکل‌ها نیز پرداخت. زیرا در خیلی مواقع نظیر طراحی شالوده‌های سطحی، مقاومت برشی خاک حاکم نیست، بلکه تغییرشکل‌ها نباید از حد مجاز و سطح بهره‌برداری تجاوز کند. ازاین‌رو، در این بخش سعی شده است تا با کمک روابط الاستیسیته، بتوان مدول تغییرشکل مخلوط‌ها را به‌دست آورد و با هم مقایسه کرد.

با فرض این‌که خاک ماسه‌ای و مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک در حین بارگذاری قائم (حین متراکم کردن)، رفتار کشسان (الاستیک) داشته باشند، می‌توان پارامترهایی نظیر تغییرشکل پذیری را به‌دست آورد.



شکل ۱۳ نمایش یک المان در دستگاه مختصات دکارتی

براساس نظریهٔ کشسانی، پارامترهای تغییرشکل یک جسم برحسب دو پارامتر مدول تغییرشکل (E) و نسبت پواسون (ν) تعریف می‌شود. یک المان از جسمی الاستیک مطابق شکل (۱۳) در دستگاه دکارتی ۱-۲-۳ درنظر گرفته می‌شود که در راستاهای ۲ و ۳ تغییرشکل ندارد و فقط در راستای ۱ در اثر بارگذاری می‌تواند تغییرشکل دهد. این شرایط مشابه با آن‌چه حین بارگذاری فشاری در آزمایش برش مستقیم و قبل از مرحلهٔ اعمال برش است، اتفاق می‌افتد. رابطهٔ کلی میان تنش و کرنش برای چنین المانی به‌صورت زیر است:

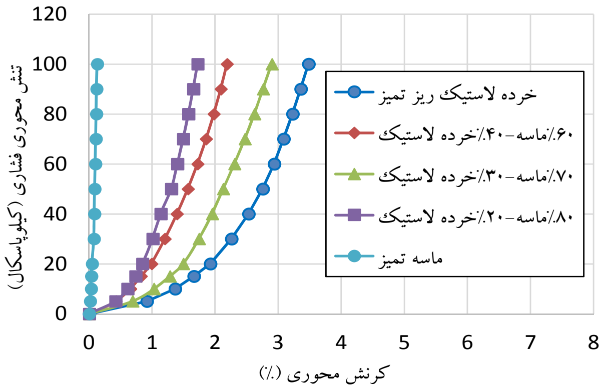
$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \dfrac{\sigma_1}{E} - \dfrac{\nu}{E}(\sigma_2 + \sigma_3) \\ \varepsilon_2 = \dfrac{\sigma_2}{E} - \dfrac{\nu}{E}(\sigma_3 + \sigma_1) \\ \varepsilon_3 = \dfrac{\sigma_3}{E} - \dfrac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، منظور از ε_i و σ_i مؤلفه‌های کرنش و تنش در راستاهای مختلف ($i = 1,2,3$) است. شرایط مرزی این المان در دستگاه برش مستقیم بدین صورت است که کرنش‌های جانبی صفر هستند. به‌عبارت دیگر: $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$. با داشتن این شرط و تعیین تنش‌های جانبی و درنهایت، ساده کردن رابطه برحسب تنش و کرنش در راستای ۱ داریم:

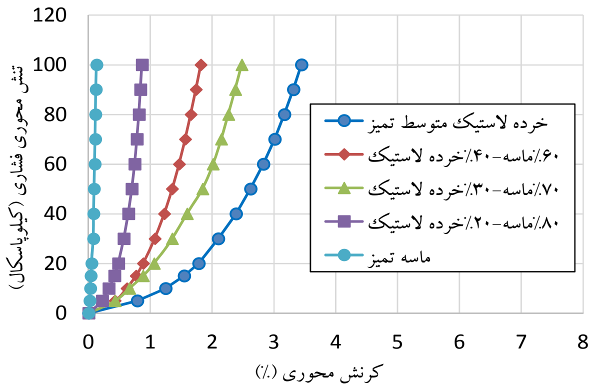
$$\sigma_1 = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\varepsilon_1 = M\varepsilon_1 \quad (2)$$

در این رابطه، $M = \dfrac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}E$ است و در مکانیک خاک کلاسیک به «مدول تغییرشکل محدودشده» شناخته می‌شود. این مدول همان پارامتری است که در آزمون تحکیم نیز به‌دست می‌آید و برابر با عکس ضریب تراکم‌پذیری (m_v) است. یادآوری می‌شود که در آزمون تحکیم هم، بارگذاری به‌صورت یک‌بعدی انجام می‌شود.

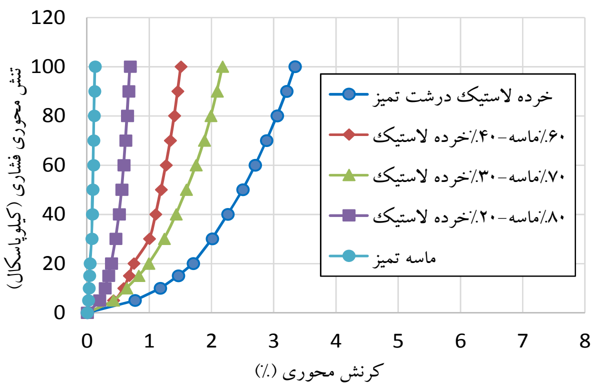
با رجوع به شکل (۵) و یادآوری این‌که بارگذاری قبل از اعمال برش در آزمون برش مستقیم، در ۱۲ گام مختلف انجام شده است، می‌توان روند میان تنش و کرنش ایجاد شده در نمونه‌های مختلف را بررسی کرد. در شکل (۱٤) رابطهٔ میان تنش- کرنش محوری در راستای ۱ (راستای بارگذاری) به‌تفکیک برای نمونه‌های مخلوط با خرده‌لاستیک‌ها با اندازه‌های مختلف نشان داده شده است. در این نمودارها، نمودار ماسهٔ تمیز نیز برای مقایسه نشان داده شده است.



(الف) مخلوط با خرده‌لاستیک ریز



(ب) مخلوط با خرده‌لاستیک متوسط



(ب) مخلوط با خرده‌لاستیک درشت

شکل ١٤ نمایش نمودار تنش- کرنش یک‌بعدی برای انواع مخلوط‌های ماسه و خرده‌لاستیک

همان‌طور که انتظار می‌رود، ماسهٔ تمیز رفتار سختی از خود نشان می‌دهد و با افزودن خرده‌لاستیک به ماسه، رفتار این مخلوط نرم‌تر می‌شود و تحت یک سربار ثابت، کرنش‌های بزرگ‌تری از خود نشان می‌دهد. مطابق شکل (١٤)، نمودار نمونهٔ ماسهٔ تمیز دارای شیب تندی است و نمونه‌های با درصدهای مختلف خرده‌لاستیک، شیب کمتری دارند. خاطرنشان می‌شود که براساس آن‌چه که در رابطهٔ (٢) به‌دست آمد

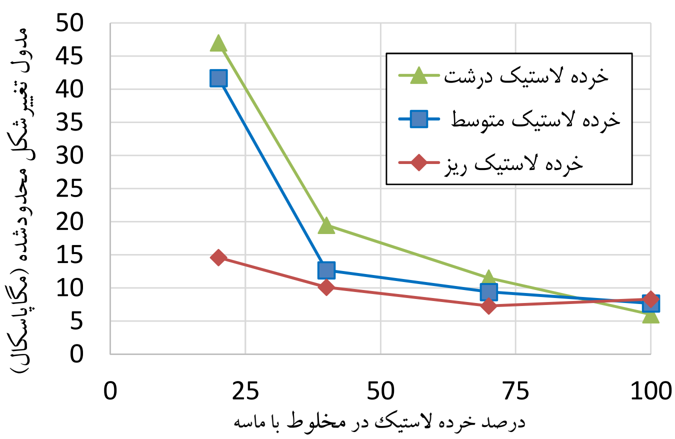
شیب این نمودارها برابر با همان مدول تغییرشکل محدودشده است. از طرفی، مشاهده می‌شود که این نمودارها در کل، شیب ثابتی ندارند و شیب در همگی آنها ابتدا کم بوده است و با ادامهٔ بارگذاری، افزایش یافته است. بااین حال، مشاهده می‌شود که این شیب، در سطح تنش بیشتر از حدود ٤٠ کیلوپاسکال، ثابت شده است. به‌نظر می‌رسد دلیل این تغییرشیب در تنش‌های کمتر از ٤٠ کیلوپاسکال، مربوط به تراکم نمونه‌ها می‌باشد. در جدول (۳) مقدار مدول تغییرشکل محدودشدهٔ مخلوط‌ها در انتهای بارگذاری (تنش عمودی ١٠٠ کیلوپاسکال) برای درصدهای اختلاط مختلف ارائه شده است. مشاهده می‌شود که مدول ماسه در برابر مخلوط‌های مختلف با خرده‌لاستیک به‌مراتب (حتی تا ١٧ برابر) بزرگ‌تر است.

جدول ۳ مقدار مدول تغییرشکل محدودشدهٔ مخلوط‌ها با تراکم ٧٥٪ (مگاپاسکال)

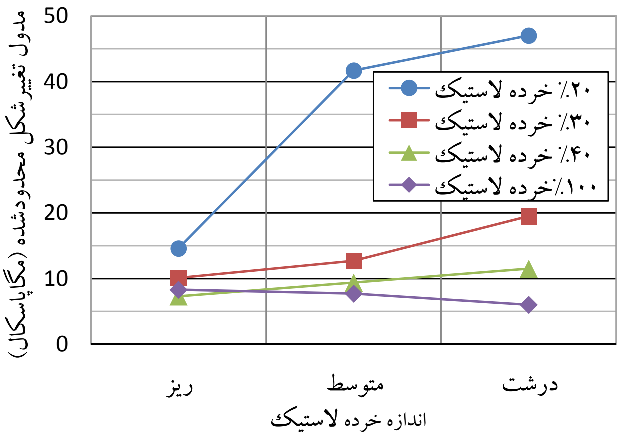
	درصد خرده‌لاستیک				
اندازهٔ خرده‌لاستیک	صفر	٢٠	٤٠	٧٠	١٠٠
ریز	١٠٢	١٥	١٠	٧.٣	٨.٣
متوسط		٤٢	١٣	٩.٤	٧.٧
درشت		٤٧	٢٠	١٢	٦

برای بررسی بهتر تأثیر نسبت اختلاط خرده‌لاستیک بر پارامتر تغییرشکل پذیری، تغییرات M با درصد خرده‌لاستیک برای سه اندازهٔ ریز، متوسط و درشت در شکل (١٥) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که به‌طور کلی، افزودن خرده‌لاستیک منجر به نرم‌تر شدن مخلوط می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که وجود اندازهٔ درشت‌تر خرده‌لاستیک، موجب سخت‌تر شدن نمونه می‌شود. با این حال، تغییرات سختی برای مخلوط خرده‌لاستیک نرم، نسبت به دو نوع دیگر کمتر است.

در شکل (١٦) روند تغییرات مدول M با اندازهٔ خرده‌لاستیک در درصدهای اختلاط ثابت نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در درصدهای مختلف اختلاط خرده‌لاستیک با ماسه، اندازهٔ خرده‌لاستیک در افزایش سختی مؤثر است. بدین معنی که هرچه اندازهٔ خرده‌لاستیک بزرگ‌تر باشد، نمونه نیز رفتار سخت‌تری از خود نشان می‌دهد. البته ذکر این نکته ضروری است که با افزایش سهم خرده‌لاستیک، افزایش سختی نیز کاهش می‌یابد به‌طوری‌که، در حالت وجود ١٠٠٪ خرده‌لاستیک، اندازهٔ خرده‌لاستیک نقشی در افزایش سختی نمونه ندارد.



شکل ١٥ تغییرات مدول تغییرشکل محدودشده با درصد اختلاط‌های مختلف



شکل ۱٦ تغییرات مدول تغییرشکل محدودشده با اندازه خرده‌لاستیک

در پایان، به این نکته اشاره می‌شود که دلیل اصلی در اختلاف رفتار مکانیکی (از نظر مقاومت برشی و تغییرشکلی) مخلوط‌های ماسه و خرده‌لاستیک را می‌توان در تغییر بافت و ماهیت مخلوط دانست. اگر به منحنی دانه‌بندی هر یک از مصالح (شکل ۲) توجه شود، مشاهده می‌شود که ماسه و خرده‌لاستیک ریز تقریباً دانه‌بندی یکسانی دارند، درصورتی‌که دانه‌بندی خرده‌لاستیک‌های متوسط و درشت بزرگ‌تر از دانه‌بندی ماسهٔ تمیز است. این بدان معنی است که در مخلوط ماسه- خرده‌لاستیک ریز می‌توان گفت که دانه بندی تقریباً فرقی نکرده و فقط زبری و تراکم‌پذیری مصالح متفاوت شده است. به‌عبارت دیگر، سهم دخالت هر دو ذرهٔ ماسه و خرده‌لاستیک با هم برابرند. درصورتی‌که در مخلوط‌های ماسه با خرده‌لاستیک‌های متوسط و درشت چنین نیست. به‌خاطر ریزتر بودن دانه‌های ماسه، به‌نظر می‌رسد که مخصوصاً در درصدهای بیشتر خرده‌لاستیک، دانه‌های ماسه نقش پرکننده را دارند و خرده‌لاستیک‌ها رفتار غالب مخلوط‌ها را تشکیل می‌دهند. به‌همین دلیل، مشاهده می‌شود که تفاوت رفتاری (هم از نظر مقاومت برشی و هم از نظر تغییرشکلی) میان مخلوط‌های با خرده‌لاستیک متوسط و درشت کم است و درعوض، رفتار این مخلوط‌ها با نتایج رفتار مخلوط با خرده‌لاستیک ریز فاصله دارد.

خلاصه و جمع‌بندی

در این مقاله، رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک شامل مقاومت برشی و تغییرشکل‌پذیری بررسی شد، بدین صورت که یک نوع ماسه با سه اندازهٔ مختلف خرده‌لاستیک در دستگاه برش مستقیم و تحت سربار مختلف بارگذاری شدند. در مرحلهٔ اول بارگذاری و قبل از اعمال برش، قابلیت تراکم‌پذیری نمونه‌ها مطالعه شد و سپس در مرحلهٔ اعمال برش، تغییرات پارامترهای مقاومت برشی (زاویهٔ اصطکاک معادل) و قابلیت تغییرشکل‌پذیری نمونه‌ها براساس درصد اختلاط و اندازهٔ دانه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. در مرحلهٔ دوم، پارامترها براساس سطح‌های مختلف تغییرشکل‌ها بررسی شدند. به‌طور خلاصه، می‌توان به نتایج زیر به‌عنوان دستاورد این پژوهش اشاره کرد:

۱. سرعت بارگذاری در دامنهٔ مورد آزمایش در این مطالعه تأثیری بر روی رفتار مکانیکی (مقاومت برشی و تغییرحجم) نمونه‌های مخلوط نداشته است.

۲. نشست‌پذیری خرده‌لاستیک نسبت به ماسه خیلی بیشتر است (حدود ۲۰ برابر). هم‌چنین، اندازهٔ خرده‌لاستیک در مقدار نشست پذیری نقش دارد، به‌طوری‌که با افزایش اندازهٔ دانه‌ها، نشست نمونه‌ها کمتر شده است.

۳. نشست‌پذیری نمونه‌ها تحت بارگذاری قائم با افزایش درصد محتوای لاستیک، افزایش می‌یابد.
٤. وزن مخصوص نمونه‌ها با افزایش درصد محتوای لاستیک، کاهش می‌یابد. در حالی‌که با افزایش اندازهٔ دانه‌های لاستیک‌های خرد شده و هم‌چنین افزایش سربار، وزن مخصوص افزایش پیدا می‌کند.
۵. زاویهٔ اصطکاک داخلی معادل، با افزایش درصد محتوای لاستیک، کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، نمونه‌های ساخته‌شده با خرده‌لاستیک‌های درشت‌تر، زاویهٔ اصطکاک داخلی بیشتری را نشان می‌دهند.
٦. در بررسی زاویهٔ اصطکاک داخلی معادل، در جابه‌جایی نه میلی‌متر از جابه‌جایی سه و شش میلی‌متر، زاویهٔ اصطکاک داخلی بزرگ‌تری مشاهده می‌شود.
۷. با این‌که ماسهٔ تحت برش به‌سرعت از خود رفتار اتساعی نشان می‌دهد، نمونه‌های حاوی فقط خرده‌لاستیک، فقط حالت تراکم پذیری دارند. اگر از حدی، اندازهٔ دانه‌ها بزرگ‌تر شود، دیگر نقشی در تغییرشکل نخواهد داشت.
۸. با افزایش درصد محتوای لاستیک، نمونه‌ها افزایش حجم کمتری از خود نشان می‌دهند و بیشتر تمایل به متراکم شدن دارند.
۹. در این مقاله، به محاسبهٔ مدول تغییرشکل محدودشده پرداخته شد و مشاهده گردید که در میان نمونه‌های مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک، سخت‌ترین نمونه مربوط به درصد اختلاط ۲۰٪ خرده‌لاستیک است.
۱۰. رفتار تغییرشکلی (سختی) نمونه با درصد اختلاط ۳۰٪ شبیه به نمونهٔ با ۱۰۰٪ خرده‌لاستیک است. درصورتی‌که نمونه‌های با درصد اختلاط بیشتر و یا کمتر، سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند.
۱۱. اندازهٔ خرده‌لاستیک‌ها در افزایش سختی نمونه‌های مخلوط با ماسه نقش مثبت دارند. اما، با افزایش سهم خرده‌لاستیک‌ها، تأثیر اندازهٔ خرده‌لاستیک‌ها کم می‌شود، به‌طوری‌که سختی نمونه‌های با ۱۰۰٪ خرده‌لاستیک، باهم برابر است.

مراجع

1. Shulman, V.L., "Tire recycling", European Tyre Recycling Association (ETRA) 15, (2004).
2. JATA, "Tyre recycling handbook", Tokyo: Japan Automobile Tire Manufacturers Association, (2007).
3. Rao, G. and R.K. Dutta, "Compressibility and strength behaviour of sand–tyre chip mixtures", *Geotechnical and Geological Engineering*. Vol. 24, pp. 711-724,(2006).
4. زارع، م. ز.، "تحلیل استراتژیک صنعت تایر ایران"، نشریهٔ صنعت لاستیک ایران، صص ۱۷-۵، ج.٦۲. (۱۳۹۰).
5. Khan, R.A. and A. Shalaby., "Performance of a road base constructed with shredded rubber tires", *in Proceeding of Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. Motreal,* Quebec, Camada, (2002).
6. Gotteland P., L.S., Bałachowski L., "Strength characteristics of tyre chips – sand mixtures", *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 27(1-2), pp. 55-66, (2005).
7. Bałachowski and P. L. Gotteland, "Characteristics of Tyre Chips-Sand Mixtures from Triaxial Tests", *Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*. Vol. 54(1), pp. 25-36, (2007).
8. Zornberg, J.G., Y.D. Costa, and B. Vollenweider. "Mechanical performance of a prototype

embankment backfill built with tire shreds and cohesive soil", in Proceedings of the 83rd Annual Meeting, Washigon D.C.: Transportation Research Board, (2004).

9. Lee, J.H., R. Salgado, A. Bernal., and C.W. Lovell., "Shredded tires and rubbersand as lightweight backfill", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 125(2), pp. 132-141, (1999).
10. Attom, M., F., "The Use of Shredded Waste Tires To improve The Geotechnical Engineering Properties of Sands", *Environmebtal Geology*. Vol. 49, pp. 497-503, (2005).
11. Cabalar, A.F., "Direct Shear Tests on Waste Tires–Sand Mixtures", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 29, pp. 411-418, (2010).
12. Humphery, D.N., Sandford, T.C., Cribbs, M. M., and Manion, W. P., "Shear Strengh and Compressibility Of Tire Chips For Use As Retaining Wall Backfill", *Transportation Research Record*. Vol. 1422, pp. 29-35, (1993).
13. Yang, S., Lohnes, R.A., and Kjartanson, B.H., "Mechanical properties of shredded tires", *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 25(2), pp. 44-52, (2002).
14. Ghazavi, M., "Shear Strength Characteristics Of Sand-mixed With Granular Rubber", *Geotechnical and Geological Engineering*. Vol. 22, pp. 401-416, (2004).
15. Moo-Young, H., K. Sellasie, D. Zeroka, and S. G., "Physical and Chemical Properties of Recycled Tire Shreds for Use in Construction", *Journal of Environmental Engineering.* Vol. 129(10), pp. 921-929, (2003).
16. Jewell, R.A. and C.P. Wroth, "Direct shear tests on reinforced sand", *Géotechnique*. Vol. 37(1), pp. 53-68, (1987).

١٧. رضاپور، ع. "بررسی اثر اندازهٔ خرده‌لاستیک بر رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و لاستیک به‌کمک آزمون DST"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، (١٣٩٢).